

비평형 2.5 난류모델을 이용한 라그랑지안 입자 확산모델 개발

Development of Lagrangian Particle Dispersion Model Based on a Non-equilibrium 2.5 Level Closure Turbulence Model

구 윤 서

안양대학교 환경공학과

(1999년 4월 14일 접수, 1999년 8월 30일 채택)

Youn-Seo Koo

Department of Environmental Engineering, Anyang University

(Received 14 April 1999; accepted 30 August 1999)

Abstract

A Lagrangian particle dispersion model (LPDM) coupled with the prognostic flow model based on non-equilibrium level 2.5 turbulence closure has been developed to simulate the dispersion from an elevated emission source. The proposed model did not require any empirical formula or data for the turbulent statistics such as velocity variances and Lagrangian time scales since the turbulence properties for LPDM were calculated from results of the flow model.

The LPDM was validated by comparing the model results against the wind tunnel tracer experiment and ISCST3 model. The calculated wind profile and turbulent velocity variances were in good agreement with those measured in the wind tunnel. The ground level concentrations along the plume centerline as well as the dispersion coefficients also showed good agreement in comparison with the wind tunnel tracer experiment. There were some discrepancies on the horizontal spread of the plume in comparison with the ISCST3 but the maximum ground level concentrations were in a good confidence range. The results of comparisons suggested that the proposed LPDM with the flow model was an effective tool to simulate the dispersion in the flow situation where the turbulent characteristics were not available in advance.

Key words : Lagrangian, model, particle, dispersion, turbulence model

1. 서 론

LPDM (Lagrangian Particle Dispersion Model)은 오염물질의 확산 계산시 수치격자 (numerical grid)를 사용하지 않으므로 수치확산 (numerical diffusion)이 없어 오일러리안 모델 (Eulerian model)에 비해

상대적으로 계산의 신뢰도가 높은 편이다. 따라서 최근에 소각로나 발전소 굴뚝들과 같은 점오염원에서 배출되는 오염물질의 확산을 계산하기 위해서 LPDM을 사용하는 것이 일반적인 추세이다 (구윤서, 1999; John *et al.*, 1998; 박순웅, 1994; Hurley *et al.*, 1991; Brusasca *et al.*, 1989). 그러나 LPDM을 수행하기 위해서는 평균바람장자료와 난류바람장의

입력자료가 필요하다. 난류바람장은 Markov process 에 의하면 난류속도 분산과 라그랑지안 상관계수들로부터 계산된다. 기존의 연구는 LPDM의 중요한 입력자료인 난류속도분산과 라그랑지안 상관계수를 측정값이나 경험식을 사용하였다. 그러나 이와 같이 중요한 변수들을 측정하는데 많은 비용과 시간이 요구되며, 현재 문헌에서 구할 수 있는 상관관계식들은 단순한 흐름구조를 나타내는 평탄지형에의 값들뿐이므로, 해안가나 복잡지형에서 대기흐름구조가 복잡하게 전개될 때에는 기존 모델을 적용하는데 어려움이 있었다. 그러나 Koo와 Reible (1995)이 개발한 비평형 2.5 난류모델을 사용하면, 바람장 계산 결과로부터 곧바로 LPDM의 입력자료인 난류특성값들을 계산할 수 있어 별도의 경험식이나 측정치가 필요하지 않다.

본 연구에서는 바람장 계산에 비평형 2.5 난류모델을 채택하여 LPDM의 입력자료인 난류특성값들을 바람장모델로부터 직접 계산함으로써 복잡한 대기흐름내 확산현상을 보다 정확히 모사할 수 있는 효율적인 LPDM을 개발하고자 한다. 본 연구에서 제시하고 있는 바람장 모델과 LPDM의 신뢰도를 검증하기 위해서 미국환경청에서 수행한 풍동확산실험과 비교하였고, 또한 현재 대기질 및 대기환경 영향평가에 많이 사용되는 ISCST3 (Industrial Source Complex Model for Short Term-Version3) 모델과 동일 대기조건에서 비교하였다.

2. 이론적 배경

본 절에서는 바람장모델과 비평형 2.5 난류모델에 대해서 간단히 설명하고 점오염원으로부터 배출되는 오염물질의 확산을 LPDM로 계산하는 방법에 대해서 설명하고자 한다.

2.1 바람장 모델

3차원으로 대기흐름을 계산하기 위한 Non-hydrostatic 모델의 지배방정식은 아래와 같다.

Continuity equation

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

여기서 x와 y는 수평방향의 좌표계를, z는 연직방

향의 좌표를 각각 나타낸다. U, V, W는 각각 x, y, z 방향으로의 시간평균 유속을 의미한다.

Momentum equation

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{u'w'}) + f(V - V_g) \quad (2)$$

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{v'w'}) - f(U - U_g) \quad (3)$$

$$\frac{DW}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xz} \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yz} \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{w'w'}) + g \quad (4)$$

여기서 K_{xx} , K_{yy} 는 수평방향의 난류확산계수이고, u' , v' , w' 은 난류속도를 각각 의미한다. f는 Coriolis parameter, 하첨자 g는 지균풍 (geostrophic wind)을 의미한다. D/Dt 는 Substantial derivative를 의미하고, 변수, Φ 에 대해서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + U \frac{\partial \phi}{\partial x} + V \frac{\partial \phi}{\partial y} + W \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (5)$$

한편 온도 (θ , potential temperature)는 아래의 에너지 보존 방정식들로부터 구할 수 있다.

$$\frac{D\theta}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{w'\theta'}) \quad (6)$$

위의 지배방정식에서 난류에디 (turbulent eddy)들에 의해 전달되는 난류전달항들을 계산하기 위해서 난류모델이 요구된다. 난류항을 계산하는데 비평형 2.5 E-ε 난류모델을 이용하면 난류전달항들은 아래의 관계로부터 구할 수 있다.

$$(\overline{u'w'}, \overline{v'w'}, \overline{w'w'}) = K_{zz}^m \left[\frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z}, \frac{\partial W}{\partial z} \right] \quad (7)$$

$$\overline{w'\theta'} = -K_{zz}^h \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (8)$$

여기서 K_{zz}^m, K_{zz}^h 은 연직방향의 난류에디확산계수 (turbulent eddy diffusivity)와 난류열확산계수 (turbulent thermal diffusivity)를 각각 의미한다. 이 값들은 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_{zz}^m = c_m \frac{E^2}{\epsilon}, \quad K_{zz}^h = c_h \frac{E^2}{\epsilon} \quad (9)$$

E 는 난류에너지를, ϵ 은 난류에너지 소실율을 나타낸다. 기존의 $E-\epsilon$ 난류모델들은 모델의 계수, c_m 과 c_h 를 상수값으로 취급하였으나 Koo와 Reible (1995)가 연구한 바에 따르면, c_m 과 c_h 은 상수가 아니고, second order closure인 algebraic stress model로부터 유도될 수 있으며, 대기흐름의 상태를 나타내는 G_M 과 G_H 의 함수이다

$$G_M = \left(\frac{E}{\epsilon}\right)^2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2 \right] \quad (10)$$

$$G_H = \beta g \left(\frac{E}{\epsilon}\right)^2 \frac{\partial \Theta}{\partial z} \quad (11)$$

β 는 열팽창계수를 의미하고, c_m 과 c_h 은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$c_m = \frac{2}{3} \frac{(c_1 - 1)(E_7 - A G_H)}{E_4 + \frac{E_4 E_8}{c_{1r}} - G_H - E_5 E_7 G_M + E_5 A G_H G_M} \quad (12)$$

$$c_h = \frac{\frac{2}{3}(c_1 - 1) + E_5 G_M c_m}{(c_{1r} + c_{1r}' f) E_4 + \left(\frac{2E_4 E_9}{E_{10}} + E_6\right) G_H} \quad (13)$$

위 식에서 하첨자가 있는 c 와 E 들은 상수값들로써 Koo와 Reible (1995)가 제시하는 값을 사용했다. 한편 난류에너지와 난류에너지소실율을 계산하기 위해서는 아래와 같은 전달방정식을 추가로 풀어야 한다.

$$\begin{aligned} \frac{DE}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz}^m \frac{\partial E}{\partial z} \right) \\ & - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} + \overline{v'w'} \frac{\partial V}{\partial z} + \overline{w'w'} \frac{\partial W}{\partial z} \right) \\ & + \frac{g}{\Theta} \overline{w'\theta'} - \epsilon \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{DE}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz}^m \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \\ & - c_{\epsilon 1} \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} + \overline{v'w'} \frac{\partial V}{\partial z} + \overline{w'w'} \frac{\partial W}{\partial z} \right) \\ & + c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{E} + c_{\epsilon 3} \frac{\epsilon}{E} \frac{g}{\Theta} \overline{w'\theta'} \end{aligned} \quad (15)$$

한편 난류속도 분산은 2.5 난류모델에 의하면 아래와 같이 바람장 계산 결과로부터 구할 수 있다. 위 식에 있는 상수값은 Koo와 Reible (1995)가 제시하는 값들을 사용했다.

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 = \overline{u'^2} = & \frac{2}{3} \frac{c_1 - 1}{c_1} E + \frac{c_1'}{c_1} \int \overline{w'^2} - \frac{E}{c_1 \epsilon} \left(E_1 \overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} \right. \\ & \left. + E_2 \overline{v'w'} \frac{\partial V}{\partial z} - E_3 \beta g \overline{w'\theta'} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \sigma_v^2 = \overline{v'^2} = & \frac{2}{3} \frac{c_1 - 1}{c_1} E + \frac{c_1'}{c_1} \int \overline{w'^2} - \frac{E}{c_1 \epsilon} \left(E_2 \overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} \right. \\ & \left. + E_1 \overline{v'w'} \frac{\partial V}{\partial z} - E_3 \beta g \overline{w'\theta'} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sigma_w^2 = \overline{w'^2} = & \frac{2}{3} \frac{c_1 - 1}{E_1} E - \frac{E}{E_4 \epsilon} \left(E_5 \overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} \right. \\ & \left. + E_5 \overline{v'w'} \frac{\partial V}{\partial z} - E_6 \beta g \overline{w'\theta'} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 각각의 변수 위의 bar는 시간에 대한 평균을 의미한다.

한편 LPDM 계산에서 요구되는 라그랑지안 적분 시간크기 (Lagrangian integral time scale, T_{Li})는 다음 식에 의해서 계산될 수 있다.

$$l = c_{ep} \frac{E^{3/2}}{\epsilon}, \quad T_{Li} = c_T \frac{l}{\sigma_i}, \quad i = u, v, w \quad (19)$$

비평형 2.5 난류모델의 신뢰성을 검증하기 위해서 Koo와 Reible (1995)는 여러 기상조건에서 측정된 자료 및 다른 복잡한 난류모델과 비교하였다. 비교결과 본 연구에서 사용하고자 하는 난류모델이 간단하고, 사용하기 편함과 동시에 기존의 측정자료 및 계산치와 잘 일치함을 확인하였다.

2.2 LPDM

라그랑지안 입자 확산 모델은 대기중의 입자상,

가스상의 오염물질을 입자로 가정하여 각각의 입자가 평균바람장(mean wind field)과 난류바람장(turbulent wind field)에 의해 움직인다고 생각하여 그 입자들의 궤적을 계산하는 Markov process이다. 오염원에서 배출된 각 입자들이 바람에 의해 대기내 3차원 공간에서 이동하는 입자의 중심좌표는 다음과 같이 계산할 수 있다(John *et al.*, 1998; Uliasz, 1990; Yamada과 Burnker, 1988).

$$\begin{aligned} x(t + \delta t) &= x(t) + \delta t [U(t) + u'(t)] \\ y(t + \delta t) &= y(t) + \delta t [V(t) + v'(t)] \\ z(t + \delta t) &= z(t) + \delta t [W(t) + w'(t)] \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, 소문자에 상첨자는 난류성분을 의미한다. δt 는 입자의 이동에 대한 시간구간이다. 이 때에 연직 및 수평 방향으로의 난류속도성분은 라그랑지안 자기상관계수(Lagrangian auto-correlation, R_i , $i=u, v, w$)와 난류속도 표준편차(standard deviation of turbulent velocity, σ_i , $i=u, v, w$)로부터 계산된다.

$$\begin{aligned} u'(t) &= R_u(t) u'(t - \delta t) + (1 - R_u^2(t))^{1/2} \sigma_u \gamma_u \\ v'(t) &= R_v(t) v'(t - \delta t) + (1 - R_v^2(t))^{1/2} \sigma_v \gamma_v \\ w'(t) &= R_w(t) w'(t - \delta t) + (1 - R_w^2(t))^{1/2} \sigma_w \gamma_w \\ &+ (1 - R_u(t)) T_{L_u} \frac{\partial \sigma_u^2}{\partial z} + w_b \end{aligned} \quad (21)$$

위 식에서 r_i ($i=u, v, w$)는 평균이 0이고, 표준편차가 1인 난수(Random number)이다 w_b 는 연기의 상승속도로 2.3절에 자세한 설명이 있다. 식(21)에서 $w'(t)$ 식의 우변에서 세 번째 항은 연직방향 난류속도의 표준편차가 급격히 변하는 대기경계층과 지표부근에서 입자가 비정상적으로 축적되는 것을 방지하기 위한 추가적인 항이다. 난류속도 표준편차는 식(16)~(18)에 있는 난류속도 분산값으로부터 얻어진다. 한편 자기상관계수는 라그랑지안 적분시간 크기(Lagrangian integral time scale, T_{L_i})로부터 계산된다.

$$R_i(t) = \exp\left(-\frac{\delta t}{T_{L_i}}\right), \quad i = u, v, w \quad (22)$$

2.3 굴뚝 배출 연기의 상승 속도식
 굴뚝과 같은 점오염원으로부터 오염물질이 배출

될 때에 연기는 굴뚝 배출 연기의 열부력에 의해서 상승한다. 연기가 상승하는 것을 LPDM로 묘사하기 위해서 Brigg의 연기상승식을 근거로 Anfossi 등(1993)이 제시한 방법을 이용했다. 배출연기 열부력에 의한 입자의 상승속도(w_b)는 입자가 연기의 상승속도와 같다는 가정 하에서 연기의 상승높이로부터 계산했다.

$$w_b = \frac{\delta z}{\delta t} = \frac{H(u, s, t + \delta t) - H(u, s, t)}{\delta t} \quad (23)$$

여기서 δz 은 입자가 연기의 열부력에 의해서 δt 시간 동안에 상승한 높이를 나타낸다. H 는 연기상승높이로 Briggs의 공식(1975)에 의하면 아래와 같다.

$$H(u, s, t) = 2.6 \left(\frac{F_p t^2}{u}\right)^{1/4} (t^2 s + 4.3)^{-1/4} \quad (24)$$

여기서 u 는 대기풍속이고, s 는 안정도변수(stability parameter)이다. F_p 는 연기 열부력에 의한 입자의 상승속도로 연기 열부력 인자(F_b , buoyancy parameter)와 연기의 요동에 의한 요동부력(F')의 합으로 나타낼 수 있다.

$$F_p = F_b + F \quad (25)$$

여기서 $F_b = gv, r^2(T - T_0)/T_0$ 로 연기의 열부력 인자이고, g 는 중력가속도, v 는 연기배출속도, r 은 굴뚝 배출구 반경, T 는 연기온도, T_0 는 주변 대기온도이다. F' 은 표준편차가 $F_b/3$ 이고, 평균이 0인 가우시안 난수이다. 실제 대기에서는 연기가 최종 상승높이까지 상승한 후에 더 이상 상승하지 않는다. 이를 w_b 에 반영하기 위해서 w_b 가 연직 난류속도 표준편차보다 작거나, 또는 연기축의 상승기울기가 0.005보다 작으면 w_b 를 무시했다.

2.4 농도의 계산

앞에서 설명한 바와 같이 오염원에서 배출된 입자가 이류 및 난류확산에 의해서 이동하면 이 입자의 분포로부터 농도를 계산하는 데는 Gaussian kernel 방법을 사용했다. Gaussian kernel 방법에 대한 자세한 설명은 이미 대기환경학회에 제출된 구윤서의 논문(1999)에 있다.

3. 결과 및 논의

본 연구에서 제시하는 모델의 신뢰도를 검증하기 위해서 모델에서 계산한 난류특성치와 농도값을 풍동에서 측정된 실험치와 비교하였다. 또한 대기질 평가에 많이 사용되고 있는 ISCST3 모델과 LPDM의 계산치와 비교하여 그 차이점을 비교·검토하였다.

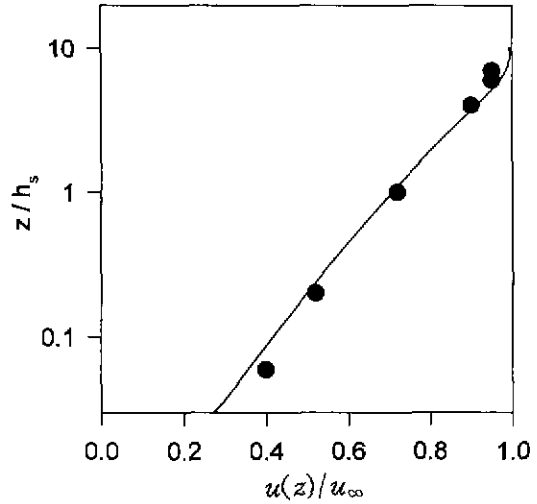
3.1 풍동실험과 비교

본 연구에서 제시하고 있는 2.5 난류모델을 이용하여 바람장과 난류특성을 계산하고, 점오염원에서 배출된 오염물질의 확산을 LPDM로 계산하였다. 바람장 모델과 LPDM의 계산 결과를 검증하기 위해서 미국 환경청 주도하에 수행된 풍동실험결과와 비교하였다(Khurshudy안 등, 1981; Snyder, 1979).

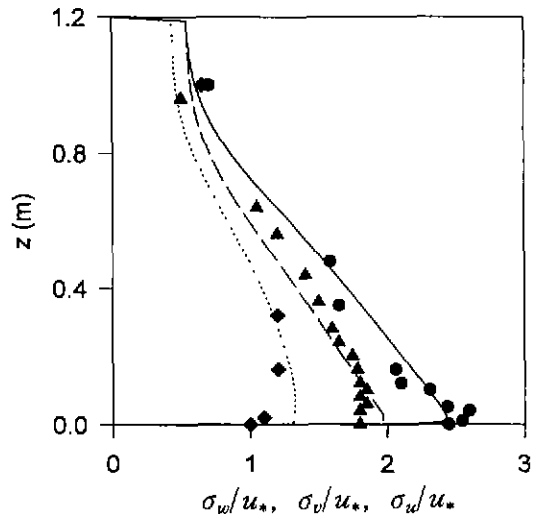
풍동실험시 조건으로 표면거칠기높이 (z_0)는 1.57×10^{-4} m이고, 풍동에서 형성된 경계층의 높이는 1 m이며, 자유유선속도 (free-stream wind speed, U_∞)는 4 m/sec이었다. 이 때에 측정된 마찰속도 (friction velocity, u)는 0.185 m/sec이었다. 실험은 평탄 및 언덕지형에서 수행되었으나 본 연구에서는 평탄지형의 실험결과만 이용하였다.

먼저 풍동과 같은 조건에서 바람장 모델로 경계층을 재현하여 바람장과 난류특성을 계산하여 풍동에서 측정된 값과 그림 1에서 비교하였다. 본 모델에 의해서 계산한 유속분포가 풍동실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 난류속도 표준편차도 연직방향의 표준편차가 지표면 부근에서 약간 크게 나타나는 것을 제외하고는 잘 일치하고 있다.

이와 같이 계산된 바람장과 난류특성을 이용하여 LPDM로 농도를 계산하여 풍동 추적자 확산실험에서 측정된 농도와 비교하였다. 풍동 확산실험에서 사용된 추적자는 에틸렌 (C_2H_4)이고, 배출원의 높이 (h_s)는 0.029 m이며, 추적자는 직경이 0.015 m인 다공성재질을 이용하여 배출하였다. LPDM로 확산을 계산하기 위해서 계산시간의 구간 (δt)은 0.05초로 하였고, 이 시간 구간에 입자는 10개씩 배출하였다. 배출원에서 입자를 위의 조건으로 배출하고 배출 시작후 15초 경과 후에 2초간 평균농도를 계산하고, 이 계산된 농도로부터 연기의 풍행방향 및 연직방향의 분산계수 (σ_y 및 σ_z)를 각각 구하였다.



(a) vertical wind profile



(b) standard deviations of velocity

Fig. 1. Comparison of the calculated wind characteristics by the LPDM and the measured ones of the wind tunnel experiment. Lines are the calculated and the symbols are the measured.

지표면의 연기중심선에서 풍하지역을 따라서 계산한 농도와 측정치와의 비교를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 농도값은 무차원 농도 ($C^* = CU_s h_s^2 / Q$) 값을 사용하였다. Q 는 배출원에서 오염물질 배출량이고, h_s (=0.029 m)은 실험에서 기준높이다. 수평

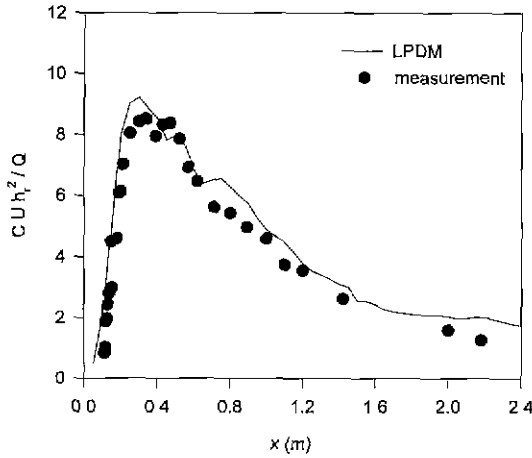


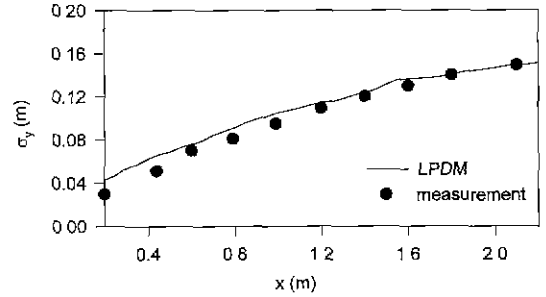
Fig. 2. Comparison of the calculated ground level concentration along the centerline with those of the wind tunnel measurements.

및 연직방향 확산계수에 대한 비교는 그림 3에 있다. LPDM로 계산한 연기중심선을 따라서 풍하지역의 지표착지농도값과 수평 및 연직 확산계수값들이 풍동 측정치와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

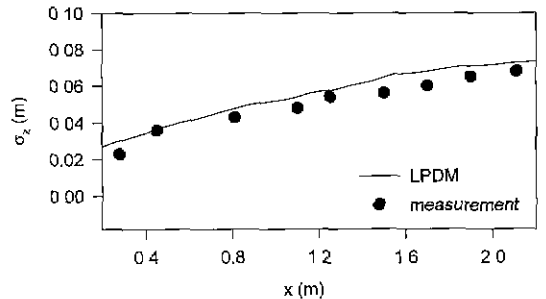
본 연구와 마찬가지로 미국환경청 풍동에 대해서 확산 계산을 수행한 Anfossi 등(1992)은 LPDM에 필요한 난류특성치를 풍동실험에서 측정한 값과 기타 경험식을 사용하여 입력자료를 작성하였으나, 본 연구에서는 측정치나 경험식은 전혀 사용하지 않고, 바람장 계산 결과로부터 바로 난류특성치를 계산할 수 있는 장점이 있다. 이와 같이 본 연구에서 제시한 비평형 2.5 난류모델을 이용한 LPDM은 기존의 라그랑지안모델과 다르게 난류특성치를 바람장 계산 결과로부터 바로 얻어지기 때문에 난류특성치가 경험식이나 측정자료가 존재하지 않는 복잡한 대기흐름내에서 대기확산 계산에 적용이 가능하다고 판단된다. 즉 해륙풍을 따라 진행되는 해안가에서 배출되는 오염물질의 이동이나, 또는 복잡지형에서 대기확산 계산에 매우 유용하게 쓰여질 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 ISCST3 모델과 비교

현재 환경영향평가 및 대기질 정책 수립에 많이 이용되고 있는 ISCST3 모델과 본 연구에서 개발한



(a) crosswind dispersion coefficient (σ_y)



(b) vertical dispersion coefficient (σ_z)

Fig. 3. Comparison of the calculated crosswind and vertical standard deviations (σ_y , σ_z) with the measurements.

LPDM과 비교하였다. 대기의 조건은 중립조건이고 글썽에서 배출되는 오염물질의 확산에 대해서 비교하였다. 먼저 바람장 모델을 이용하여 계산한 풍속 분포와 난류에디 확산계수, 그리고 라그랑지안 확산 계산에 필요한 혼합길이와 라그랑지안 시간크기를 계산하였고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 바람장 계산시 지균풍의 속도가 10 m/sec이고, z_0 가 0.1 m인 경우였다. 계산결과 대기경계층의 높이는 1310m이고, 마찰속도는 0.36 m/sec로 나타났다. 대기 중립조건에서 측정한 난류속도 분산값과 바람장모델에서 계산한 난류속도 분산값을 그림 5에 비교하였다. 전체적으로 측정치와 비교치가 잘 일치하고 있고, 전형적인 중립대기조건임을 알 수 있다(Koo와 Reible, 1995; Stull, 1988).

이와 같은 바람장과 난류특성값이 나타내는 중립 대기조건하에서 높이가 100m인 오염원에서 배출되는 입자가 풍하지역으로 수평 및 연직방향으로 확산되면서 이동하는 분포를 그림 6에 나타내었다. 계

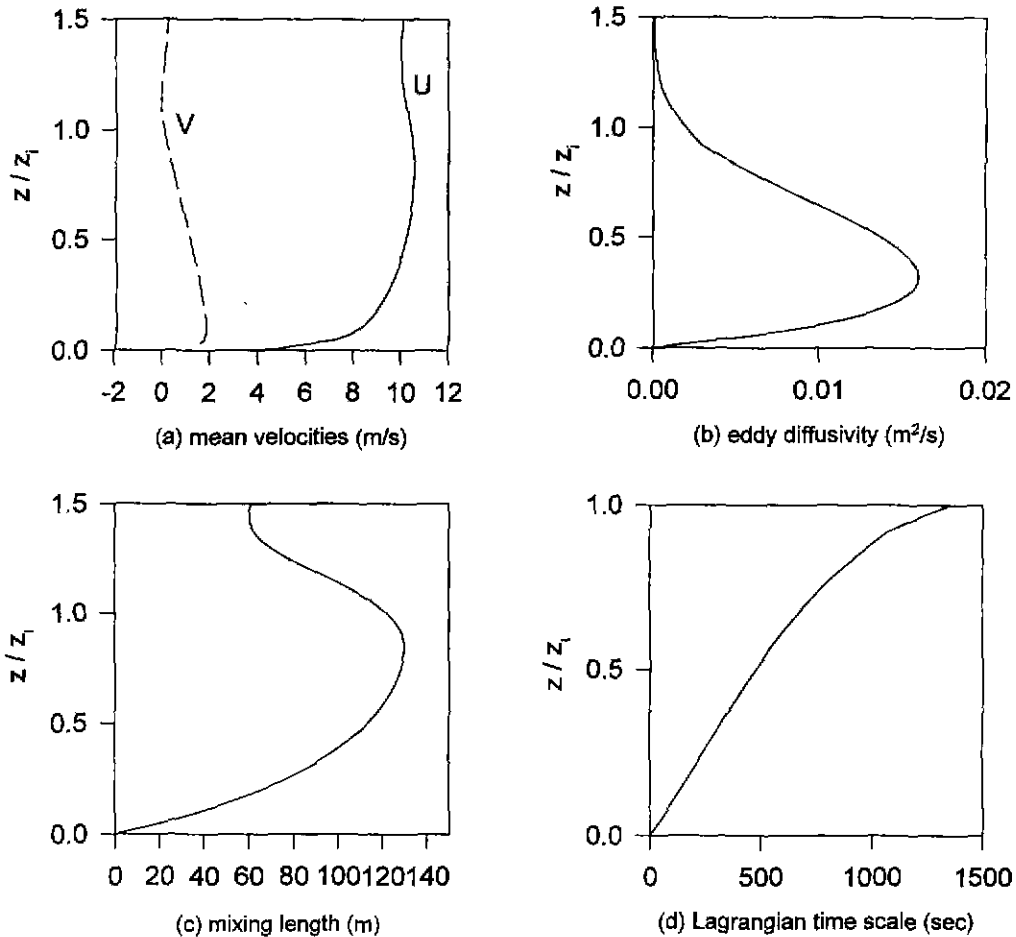
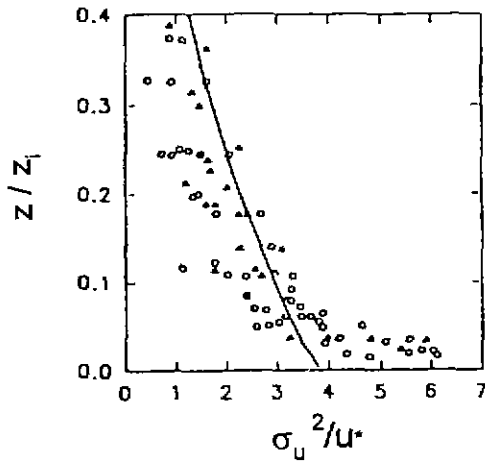


Fig. 4. Flow characteristics of neutral boundary layer generated by flow model ($U_0=10$ m/s, $u_*=0.36$ m/s, $Z_i=1310$ m).

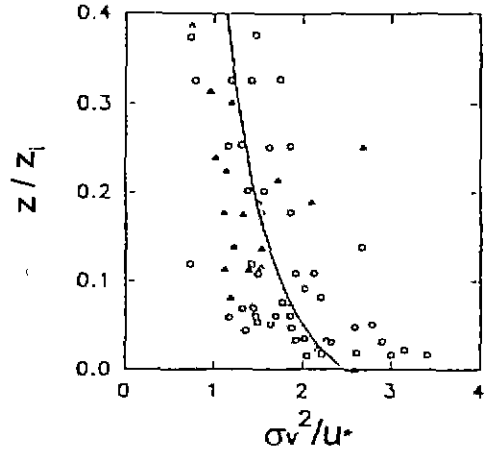
산시 배출량은 10 g/sec로 가정하였다. 그림 6과 같이 계산 영역내 분포한 입자들로부터 Gaussian kernel 방법을 이용하여 농도를 계산하였다. 지표면에서 연기중심선을 따라서 풍하방향으로 지표착지농도와 $x=10$ km에서 풍횡 방향으로 지표농도를 LPDM과 ISCST3모델로 각각 계산하여 그림 7에서 비교하였다. 연기중심선에서 지표 착지농도는 비교적 양호하게 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 수평방향의 확산 범위는 LPDM이 적게 나타났다.

한편 열부력을 가진 연기를 따라서 배출된 오염물질의 확산에 대해서 비교하였다. 비교시 열부력은 $F_0=300$ m²/s²로, 실제 굴뚝직경이 3.5 미고, 배출속

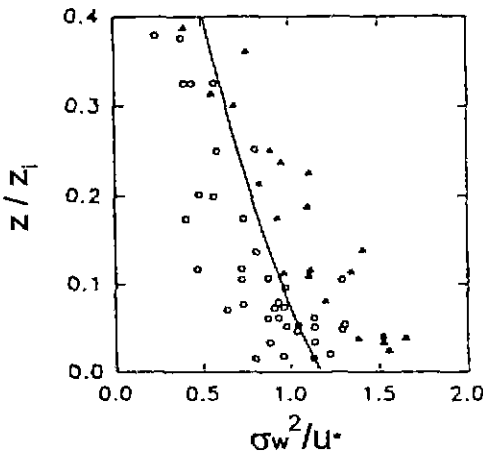
도가 30 m/sec, 배출온도가 413 K이며, 배출원 높이에서 대기풍속이 8.1 m/sec인 경우에 해당된다. 이와 같은 배출조건에서 굴뚝에서 배출된 입자의 분포는 그림 8에 나타내었다. 굴뚝에서 배출된 연기가 열부력에 의해서 상승한 다음 연직 확산이 되는 것을 보여주고 있다 열부력에 의한 연기상승높이는 ISCST3 모델인 경우에 145 m이고, LPDM인 경우에는 150 m로 잘 일치하고 있다. 이와 같이 계산영역내에 분포한 입자들로부터 연기중심선에서 풍하방향으로 지표 착지농도와 $x=10$ km에서 풍횡방향으로 농도를 각각 계산하여 ISCST3 모델과 비교한 결과를 그림 9에 나타내었다. 연기중심선을 따라서 지표착지농도



(a) downwind velocity variance (m^2/s^2)



(a) crosswind velocity variance (m^2/s^2)



(a) vertical velocity variance (m^2/s^2)

Fig. 5. Velocity variances calculated by flow model in the nearneutral boundary layer ($U_0=10$ m/s, $u_*=0.36$ m/s, $z_i=1310$ m). Solid lines are calculated values and symbols are the measurements (Koo and Reible, 1995).

의 최대값은 두 모델의 결과가 유사하나, 풍횡방향으로 확산의 정도도 LPDM이 적게 예측하고 있는 것으로 나타났다.

이상의 비교결과를 요약하면 ISCST3 모델과 LPDM의 최대지표농도는 유사하나, 수평방향으로의 확산은 LPDM이 ISCST3 보다 과소하여 예측하는 것으로 나타났다. 이는 ISCST3에서 사용하고 있는 Pasquill과 Gifford에 의한 확산계수들이 실제 지표면에서 관찰된 대기실험에 의해서 유추된 값들이기

때문에 높은 배출원에 대한 수평확산을 과대 계산하는 경향이 있다고 판단된다(정익훈 등, 1997). 또한 미국 환경청 모델 지침서(1998)에 의하면 ISCST3 모델의 기본 이론인 가우시안 확산식은 풍속을 일정하게 가정하므로 실제로 50% 내외의 오차는 예상되는 모델이다. 이러한 가우시안모델의 가정에도 불구하고 LPDM로 계산한 결과와 ISCST3 모델로 계산한 지표농도의 최대값과 최대농도 착지점이 비교적 양호하기 일치하는 것은 매우 흥미있는 사실

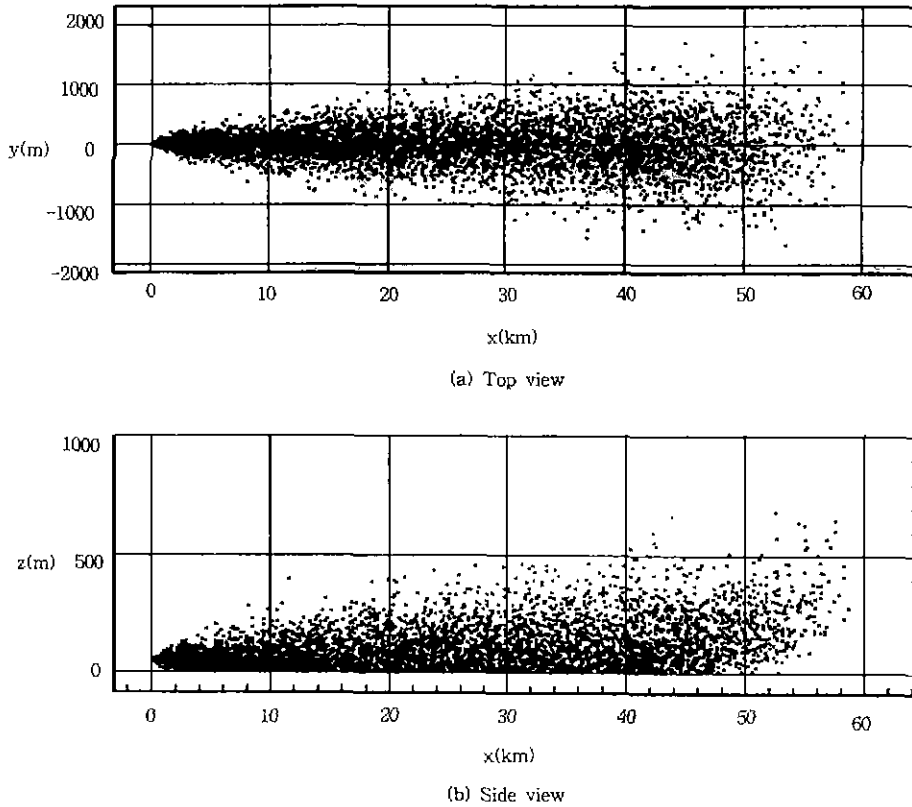


Fig. 6. The Lagrangian particle distribution emitted from a stack ($H_s=100$ m, $F_b=0$ m⁴s⁻³).

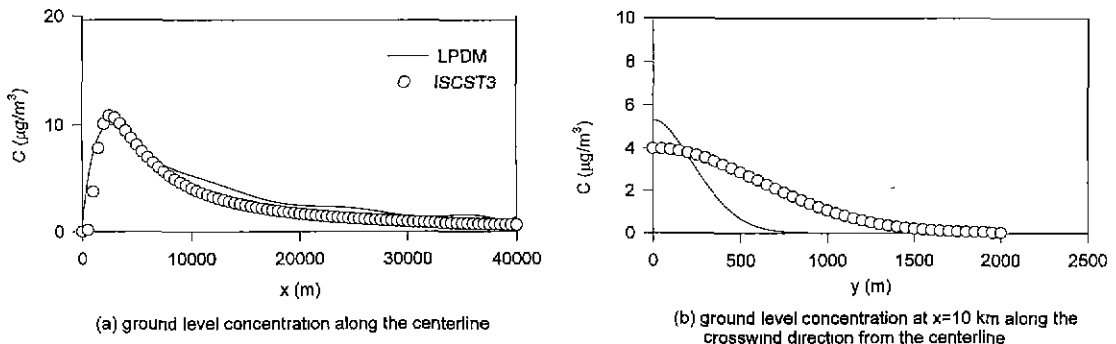


Fig. 7. Comparison of the ground level concentrations calculated by LPDM with those calculated by ISCST3 ($H_s=100$ m, $F_b=0$).

이다. 향후 실제 대기확산실험을 통해서 LPDM 뿐만 아니라 ISCST3 모델에 대한 신뢰성에 대해서 좀더 자세한 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 비평형 2.5 난류모델을 이용하여

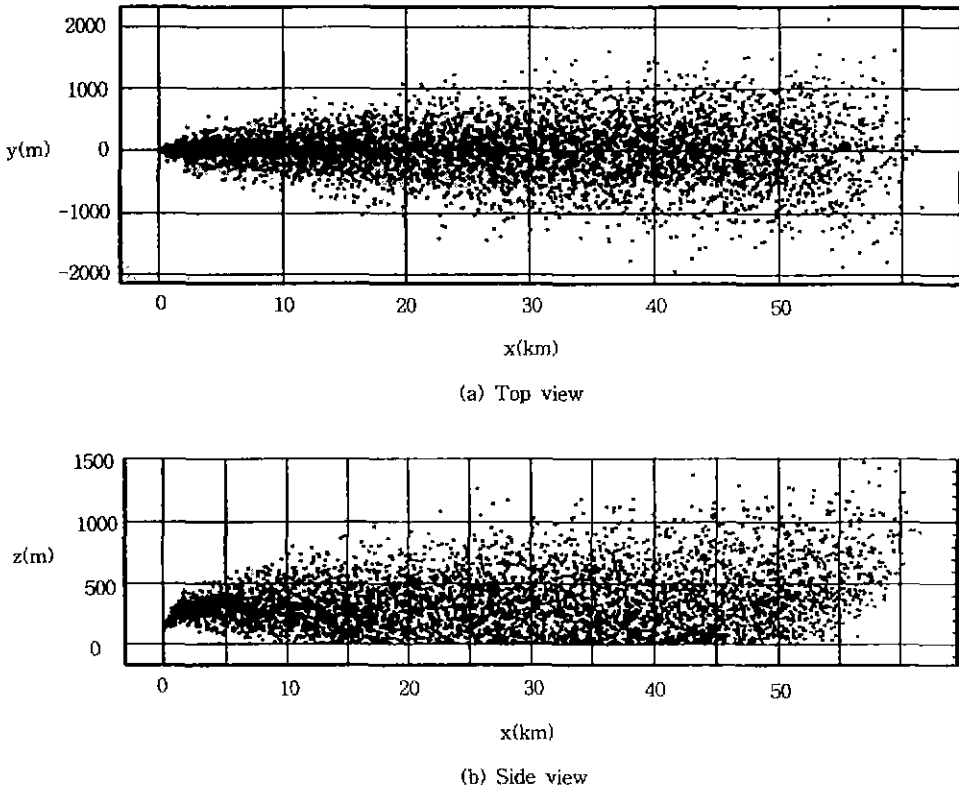


Fig. 8. Lagrangian particle distribution emitted from a stack ($H_s=100$ m, $F_b=600$ m⁴s⁻³).

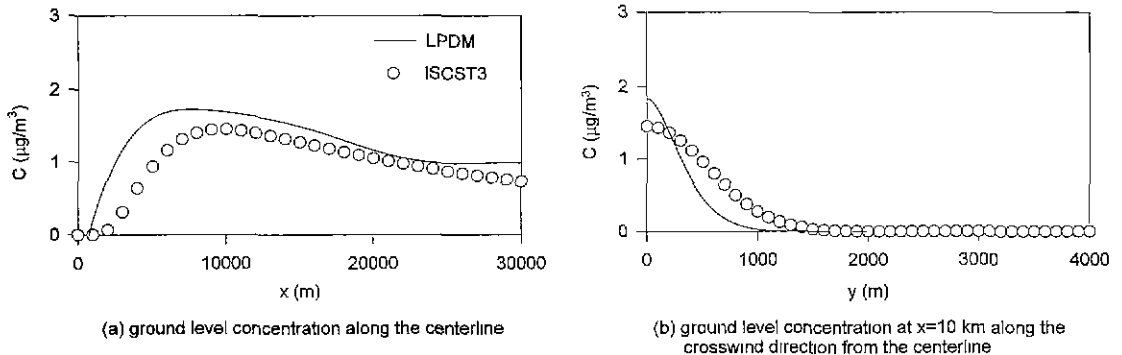


Fig. 9. Comparison of the ground level concentrations calculated by LPDM with those calculated by ISCST3 ($H_s=100$ m, $F_b=300$ m⁴s⁻³).

계산된 바람장과 난류특성치를 입력자료로 하여 수행되는 LPDM를 제시하였다. LPDM로 계산한 농도 값과 미국환경청 풍동실험에서 측정된 농도와 비교

한 결과, 바람장 모델을 이용하여 계산한 바람장과 난류특성치가 실험치와 잘 일치하고, 지표 착지농도 및 확산계수 값들도 잘 일치하는 것을 확인하였다.

또한 LPDM과 ISCST3 모델을 대기 중립조건에 대해서 비교하였다. 비교 결과 두 모델이 지표 최대농도값은 비교적 잘 일치하나, ISCST3 모델이 수평방향의 확산을 과대 평가하는 경향이 있다.

본 연구에서 제시한 비평형 2.5 난류모델을 이용한 LPDM은 난류특성치가 경험식이나 측정자료가 존재하지 않는 복잡한 대기흐름내에서 대기확산 계산에 적용이 가능하다고 판단된다. 즉 해륙풍을 따라 진행되는 해안가에서 배출되는 오염물질의 이동이나, 또는 복잡지형에서 대기확산 계산에 매우 유용하게 쓰여질 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 평탄지형에 대해서만 연구하였으나, 향후 복잡지형에서 LPDM 연구를 수행하여 모델의 적용성을 향상시킬 예정이다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 학술진흥재단 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음을 밝히며, 이에 감사를 포함한다.

참 고 문 헌

구윤서 (1999) 라그랑지안 모델의 개발 (농도계산방법의 검토), 한국대기환경학회지, 심사중.
 박순웅 (1994) 라그랑지 입자 확산모델을 이용한 비반응 오염물질 농도추정, 한국기상학회지, 30(1), 1-20.
 정익훈, 봉춘근, 김신도 (1997) 풍동실험에서 대기안정도에 관한 연구, 한국대기보전학회 추계학술대회 요지집, 77-78
 Anfossi, D., E Ferrero, G. Brusasca, A. Marzorati and G. Tinarelli (1993) A simple way of computing buoyant plume rise in Lagrangian Stochastic Dispersion Models, Atmos. Environ., 27A(9), 1443-1451.
 Anfossi, D., E. Ferrero, G. Brusasca, G. Tinarelli, F. Tampieri, F. Trombetti and U. Giostra (1992) Dispersion simulation of a wind tunnel experiment with Lagran-

gian particle models, Nuovo Cimento, 15(2), 139-158.
 Briggs, G.A (1975) Plume rise predictions. In lectures on air pollution and environmental impact analysis, American Meteorological Society Boston.
 Brusasca, G, G. Tinarelli and D. Anfossi (1989) Comparison between the results of a Monte Carlo atmospheric diffusion model and tracer experiments, Atmos. Environ., 23(6), 1263-1280
 Hurley, Peter and William Physick (1991) A Lagrangian particle model of fumigation by breakdown of the nocturnal inversion, Atmos Environ., 25A, 1313-1325.
 John, S. Nasstrom and John C. Pace (1998) Evaluation of the effect of meteorological data resolution on Lagrangian particle dispersion simulation using the ETBX experiment, Atmos. Environ., 32(24), 4187-4194.
 Koo, Y.S. and D. D. Reible (1995) Flow and transport modeling in the sea breeze, Part I: A modified E-ε model with a non-equilibrium level 2.5 closure", Boundary-Layer Meteorology, 75, 109-140
 Kunrshudyan, L.H., W.H. Synder and I.V. Nekrasov (1981) Flow and dispersion of pollutants over two dimensional hills, U.S. Environmental Protection Agency Report No. EPA-600/4-79-051
 Stull, R.B (1988) An introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publisher
 Synder, W.H. (1979) The EPA meteorological wind tunnel: its design, construction, and operating characteristics, U.S. Environmental Protection Agency Report No. EPA-600/4-81-067
 Ullasz, M (1990) Development of the mesoscale dispersion modelling system using personal computers Part I: models and computer implementation, Z. Meteorol., 40, 110-120.
 USA-EPA (1998) Appendix W to part 51-Guideline on air quality models.
 Yamada, T. and S. Burnker (1988) Development of a nested grid second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT brush creek data simulation, J. of Applied Meteorology, 27, 562-563.